CONCEPTOS BASICOS DEL RUIDO AMBIENTAL



1. EL FENOMENO FISICO
2. CARACTERIZACION DEL RUIDO
3. LA PROPAGACION DEL SONIDO
4. INDICES PARA LA EVALUACION DEL RUIDO AMBIENTAL



1. EL FENÓMENO FÍSICO

1.1. Las ondas sonoras

Un sonido es un fenómeno físico que consiste en la alteración mecánica de las partículas de un medio elástico, producida por un elemento en vibración, que es capaz de provocar una sensación auditiva. Las vibraciones se transmiten en el medio, generalmente el aire, en forma de ondas sonoras, se introducen por el pabellón del oído haciendo vibrar la membrana del tímpano, de ahí pasa al oído medio, oído interno y excita las terminales del nervio acústico que transporta al cerebro los impulsos neuronales que finalmente generan la sensación sonora.

En el aire, que es el medio al que habitualmente nos referiremos, el fenómeno se propaga por la puesta en vibración de las moléculas de aire situadas en la proximidad del elemento vibrante, que a su vez transmiten el movimiento a las moléculas vecinas, y así sucesivamente. La vibración de las moléculas de aire provoca una variación de la presión atmosférica, es decir, el paso de una onda sonora produce una onda de presión que se propaga por el aire. La velocidad de propagación en este medio, en condiciones normales de temperatura y presión, es de aproximadamente 340 m/s.

Esta variación de la presión se denomina **presión acústica o presión sonora**, y se define como la diferencia en un instante dado entre la presión instantánea y la presión atmosférica. La presión acústica varía muy bruscamente con el tiempo; estas variaciones bruscas son percibidas por el oído humano, creando la sensación auditiva (Gráfico 1.1).

Las ondas sonoras se atenúan con la distancia y pueden ser absorbidas o reflejadas por los obstáculos que encuentran a su paso.

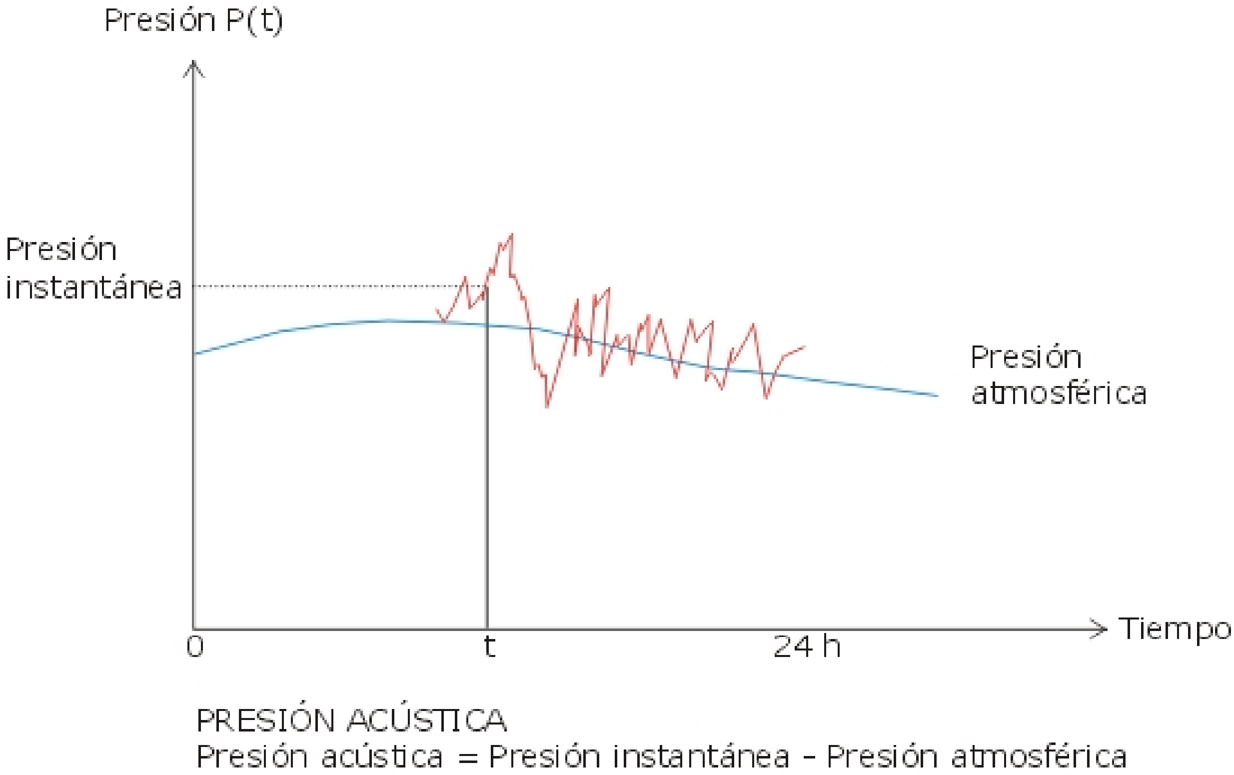


Gráfico 1.1. Presión acústica

1.2. El movimiento ondulatorio

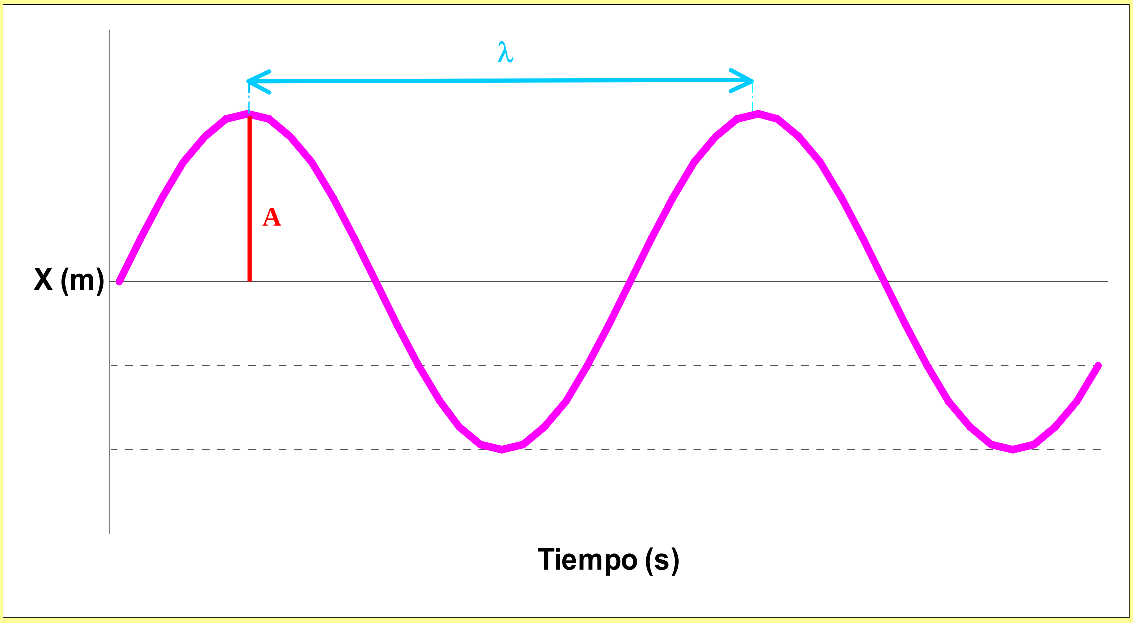
El movimiento ondulatorio se caracteriza por la propagación de movimiento o energía a través de un medio. Si la dirección del movimiento de las partículas es paralela a la dirección de propagación el movimiento ondulatorio es longitudinal; si la dirección del movimiento es perpendicular, el movimiento es transversal.

En la propagación de un movimiento ondulatorio se define por frente de onda al lugar geométrico de todos los puntos del medio que están en el mismo estado de vibración, los cuales se hallan formando una superficie. Cuando las perturbaciones se propagan en todas las direcciones a partir de un foco puntual diremos que la propagación se realiza por ondas esféricas.

En los frentes de onda planos, todos los puntos están en las mismas condiciones de vibración en un instante t y se propagan en la misma dirección.

El movimiento queda definido por una serie de magnitudes:

- Magnitudes de espacio (elongación, amplitud, ciclo o vibración)
- Magnitudes de tiempo (periodo, fase y tiempo)
- Magnitudes que relacionan espacio y tiempo (frecuencia)



$Y(x,t) = A \cdot \text{sen}(w \cdot t - kx)$
Siendo $k = 2\pi / \lambda$

Gráfico 1.2. Onda sinusoidal

AMPLITUD (A)

Es el valor máximo del movimiento de una onda (A).

PERIODO (T)

El periodo es el tiempo transcurrido por un punto que alcanza sucesivamente la misma posición. El periodo depende de las características iniciales de la perturbación.

LONGITUD DE ONDA (λ)

La distancia entre dos puntos consecutivos en el mismo estado de vibración se denomina longitud de onda (λ);

La velocidad de propagación v es la distancia recorrida por la onda por unidad de tiempo. Si consideramos un ciclo completo, el tiempo será T y la distancia recorrida λ:

$V = \lambda / T$

FRECUENCIA (f)

El número de perturbaciones -pulsaciones- por segundo se llama frecuencia del sonido y se mide en herzios (Hz). Las frecuencias más bajas se corresponden con lo que habitualmente llamamos sonidos "graves"; las frecuencias más altas se corresponden con lo que llamamos "agudos"

$f = 1 / T$

ESPECTRO DE FRECUENCIAS

Los ruidos se pueden descomponer en una superposición de sonidos puros de frecuencias diferentes. La repartición de la energía sonora en función de cada una de estas frecuencias define el espectro de frecuencias de ruido. El conocimiento del espectro permite establecer si el ruido contiene frecuencias bajas (graves), medias o altas (agudas). Este es un fenómeno importante de la investigación, ya que el oído humano reacciona de manera diferente según las frecuencias, y la propagación del ruido en el aire y a través de los obstáculos depende asimismo del espectro de frecuencias del ruido.

El dominio audible de frecuencias se sitúa aproximadamente en el intervalo 20-20.000 Hz. Para realizar un análisis de frecuencias- análisis espectral- se descompone este intervalo en bandas, y se determina el nivel de presión sonora correspondiente a cada una de las bandas. Estas bandas pueden ser:

-De ancho constante

$\Delta f = k$

-De ancho proporcional a la frecuencia central.

$\Delta f / f_c = k$

Este último tipo de repartición es el más utilizado en la práctica, y es el que corresponde al análisis por filtros de octava y por filtros de tercio de octava.

Cada octava y tercio de octava se denomina por el valor de su frecuencia central en Hz. Las frecuencias centrales del espectro se articulan alrededor del valor 1000 Hz.

La anchura de los filtros de octava es

$f_2 - f_1 = 0{,}707\ f_c$, siendo $f_2 = 2\ f_1$

f_1, f_2 son las frecuencias extremas de cada banda.

La anchura de los filtros de tercio de octava es

$f_2 - f_1 = 0{,}232\ f_c$, siendo $f_2 = \sqrt[3]{2}\ f_1$

El análisis espectral realizado en tercios de octava es más fino que en octavas. Los niveles obtenidos para una octava son superiores a los obtenidos para un tercio de octava, ya que cada uno de los primeros resulta de la suma energética de los niveles de los tres tercios de octava que contienen.

OCTAVAS en Hz	1/3 OCTAVAS en Hz
	16
	20
	25
31,5	31,5
	40
	50
63	63
	80
	100
125	125
	160
	200
250	250
	315
	400
500	500
	630
	800
1000	1000
	1250
	1600
2000	2000
	2500
	3150
4000	4000
	5000
	6300
8000	8000
	10000
	12500
16000	16000
	20000

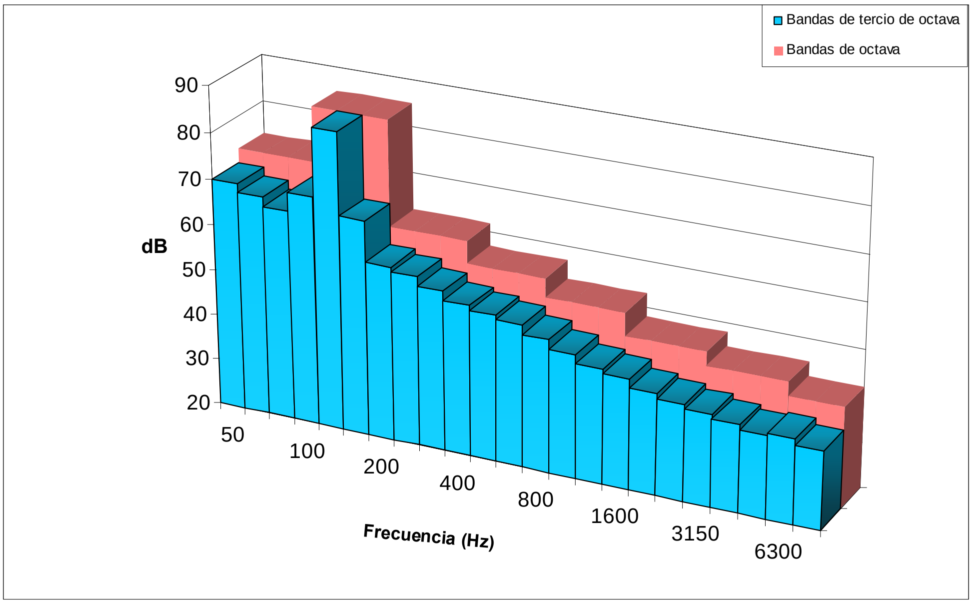


Gráfico 1.3. Espectro en bandas de octava y tercio de octava

PRESIÓN SONORA

Una fuente sonora produce una cierta cantidad de energía por unidad de tiempo, esto es una cierta potencia sonora. Esta es una medida básica de cuanta energía acústica puede producir una fuente sonora con independencia del contorno. La energía sonora fluye de la fuente al exterior, aumentando el nivel de presión sonora existente. Cuando medimos el nivel de presión sonora, éste no sólo dependerá de la potencia radiada y de la distancia radiada respecto de la fuente, también dependerá de la cantidad de energía absorbida y de la cantidad de energía transmitida.

Puesto que la presión sonora es una magnitud variable de un punto a otro, en ciertas circunstancias es conveniente utilizar como medida de amplitud del sonido otras magnitudes en lugar de la presión. Se pueden utilizar tres magnitudes para definir la amplitud de una onda sonora:

Presión	P
Potencia	W
Intensidad	I

Para una onda plana propagándose en campo libre:

$$I = \frac{p^2}{\rho \cdot c} = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

donde:

ρ es la densidad del medio
c es la velocidad de propagación de la onda sonora
r es la distancia de la fuente sonora al punto de medida.

Para el aire a 20º C el producto entre la densidad del aire y la velocidad de propagación del sonido es de 407 rayls aproximadamente

La presión sonora es la presión que se genera en un punto determinado. El nivel de presión sonora se mide en dB y determina el nivel de presión que realiza la onda sonora en relación a un nivel de referencia que es 2·10-5 Pascales en el aire.
Es el parámetro más fácil de medir, se mide con un sonómetro. Su valor depende del punto donde midamos.

INTENSIDAD SONORA

La intensidad acústica se define como la cantidad de energía sonora transmitida en una dirección determinada por unidad de área. Para realizar la medida de intensidades se utiliza actualmente analizadores de doble canal con posibilidad de espectro cruzado y una sonda que consiste en dos micrófonos separados a corta distancia. Permite determinar la cantidad de energía sonora que radia una fuente dentro de un ambiente ruidoso. No es posible medirlo con un sonómetro. El nivel de intensidad sonora se mide en w/m2.

POTENCIA SONORA

La potencia acústica es la cantidad de energía radiada por una fuente determinada. El nivel de potencia acústica es la cantidad de energía total radiada en un segundo y se mide en w. La referencia es 1pw = 10^{-12} w.

La potencia acústica es un valor intrínseco de la fuente y no depende del lugar donde se halle.

La potencia acústica de un foco sonoro es constante y solo depende de las características de la fuente. En cambio, la intensidad y la presión varían inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

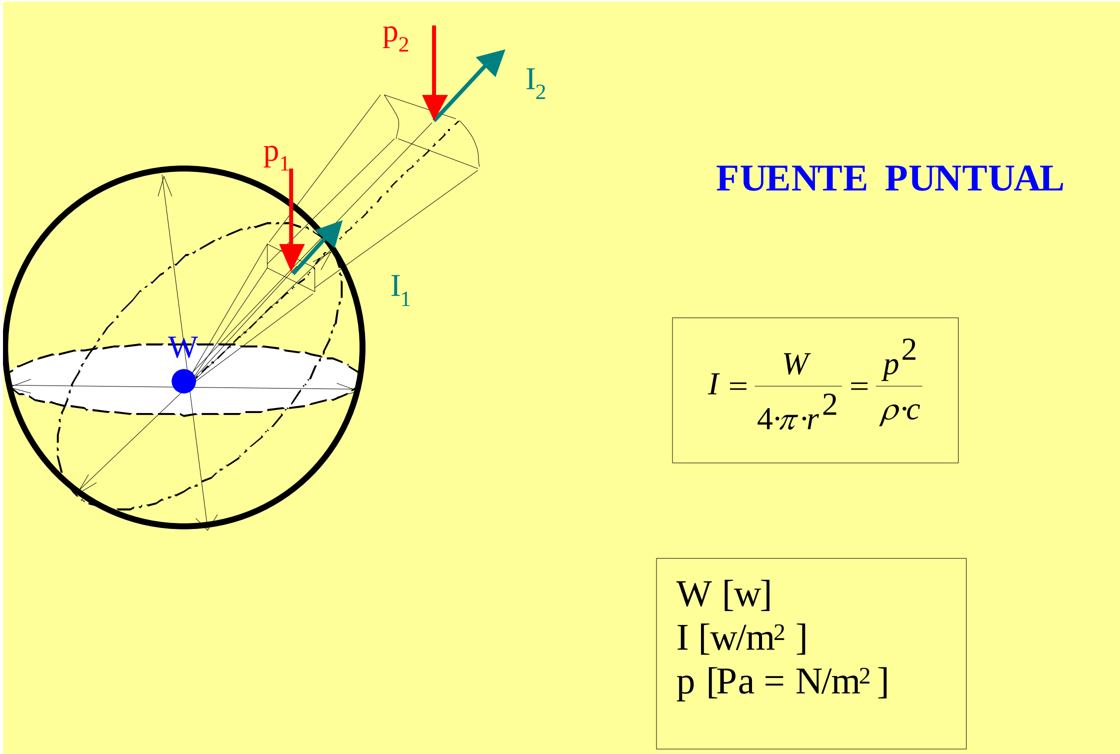


Gráfico 1.4. Presión, intensidad y potencia sonora

2. CARACTERIZACION DEL RUIDO

2.1. Ruidos y sonidos

El ruido se define como aquel sonido no deseado. Es aquella emisión de energía originada por un fenómeno vibratorio que es detectado por el oído y provoca una sensación de molestia. Es un caso particular del sonido: se entiende por ruido aquél sonido no deseado.

Un ruido es la sensación auditiva no deseada correspondiente generalmente a una variación aleatoria de la presión a lo largo del tiempo. Es un sonido complejo, y puede ser caracterizado por la frecuencia de los sonidos puros que lo componen y por la amplitud de la presión acústica correspondiente a cada una de esas frecuencias. Si estas últimas son muy numerosas, se caracteriza entonces el ruido por la repartición de la energía sonora en bandas de frecuencias contiguas, definiendo lo que se denomina espectro frecuencial del ruido. El espectro de frecuencias de un ruido varía aleatoriamente a lo largo del tiempo, a diferencia de otros sonidos complejos, como los acordes musicales, que siguen una ley de variación precisa.

Existen multitud de variables que permiten diferenciar unos ruidos de otros: su composición en frecuencias, su intensidad, su variación temporal, su cadencia y ritmo, etc.

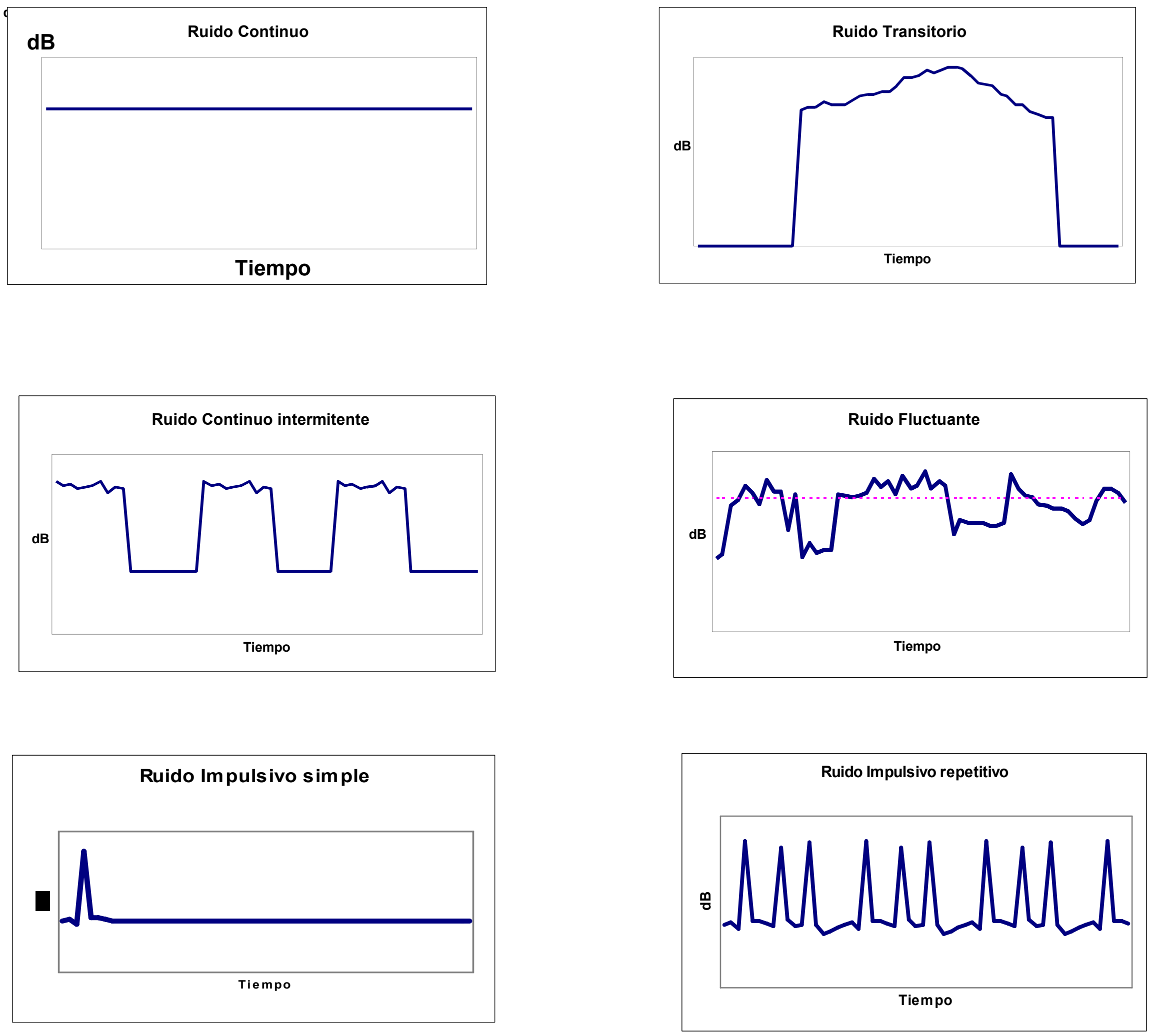


Gráfico 1.5. Tipos de ruido

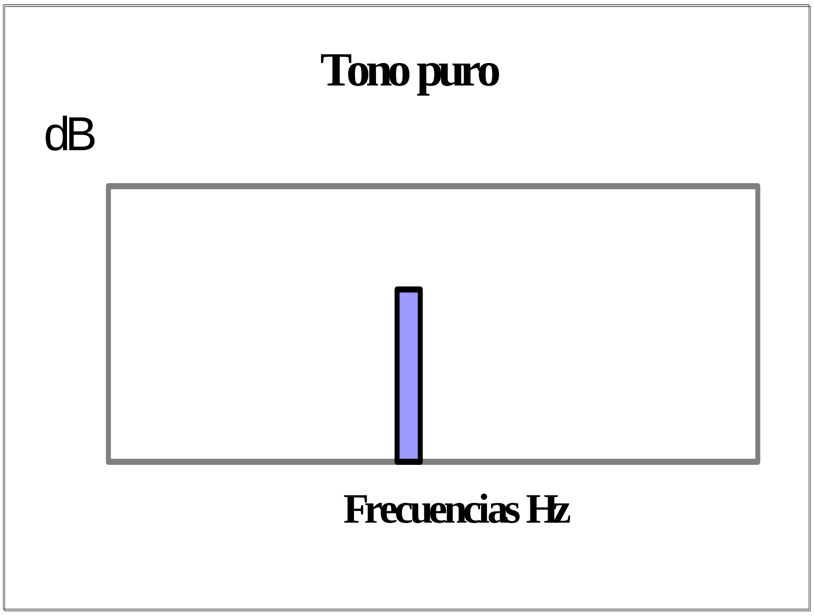


Gráfico 1.6. Sonido puro (monotonal)

2.2. Niveles sonoros. El decibelio.

Las presiones acústicas a las cuales es sensible el oído humano varían en un intervalo enorme. Así, el umbral inferior de la audición humana, es decir, la presión acústica mínima que provoca una sensación auditiva, es 2 . 10^{-5} Pa., y el umbral máximo es de alrededor de 20 Pa.

La manipulación de valores que cubren un campo tan extenso no resulta cómoda, por lo que se recurre a la utilización de otra escala, logarítmica, y otra unidad, el decibelio.

Se define el nivel de presión sonora L por la expresión:

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_o^2} = 20 \cdot \log \frac{p}{p_o}$$

donde P_o es el valor de referencia de la presión acústica que representa la menor presión acústica audible por un oído humano normal, 2 . 10^{-5} Pa., y P_{ef} la presión acústica eficaz. L se expresa en decibelios (dB).

El comportamiento del oído humano está más cerca de una función logarítmica que de una lineal. Un oído humano es capaz de percibir y soportar sonidos correspondientes a niveles de presión sonora entre 0 y 120 dB. Este último nivel de ruido marca aproximadamente el denominado “umbral del dolor”. A niveles de ruido superiores pueden producirse daños físicos como rotura del tímpano.

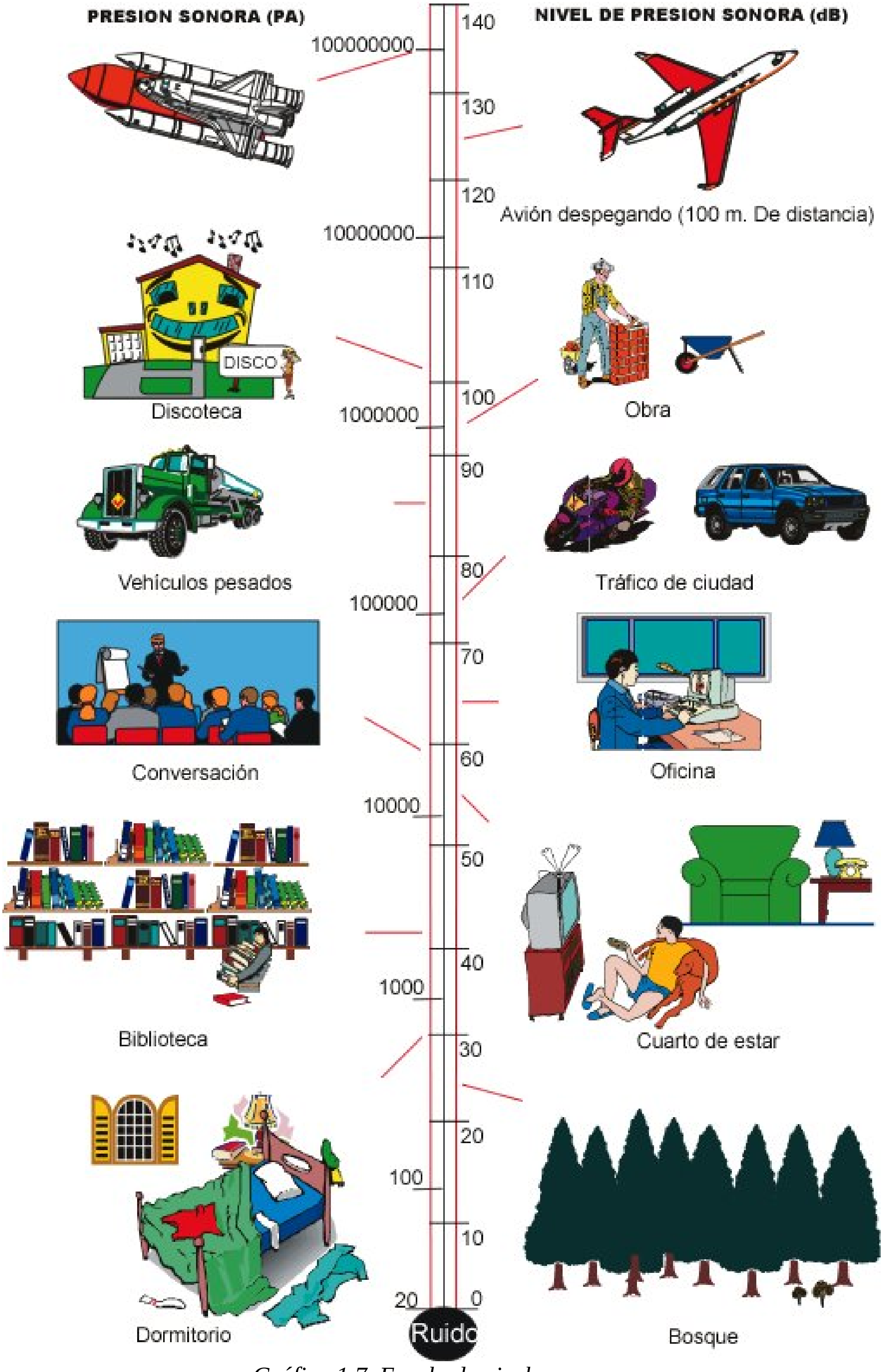


Gráfico 1.7. Escala de niveles sonoros

Suma de niveles sonoros

Cuando dos fuentes sonoras radian sonido, ambas contribuyen en el nivel de presión sonora existente en un punto alejado de dichas fuentes. Si las dos radian la misma cantidad de energía, en un punto equidistante de ambas fuentes la intensidad sonora será dos veces mayor que si solamente tuviéramos una fuente radiando. Ya que la intensidad es proporcional al cuadrado de la presión, entonces al doblar la intensidad produce un incremento de 3 dB en la presión sonora existente.

Cuando sumamos la contribución de dos o más fuentes, ésta no es igual a la suma numérica de los valores individuales en dB.

El método numérico para sumar niveles sonoros es el siguiente:

$$L_{Total} = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{L_i}{10}}$$

donde n es el número de fuentes sonoras y los niveles L_i son los niveles debidos a cada una de las fuentes expresados en dB.

Existe un método gráfico que permite sumar niveles sonoros de dos en dos y que se apoya en la utilización del ábaco siguiente:

Al sumar dos niveles, primero se halla la diferencia entre ambos, y este valor se introduce en el eje de las abscisas del gráfico. El valor donde se cruza con la curva es el incremento de dB que hay que sumar al valor más alto.

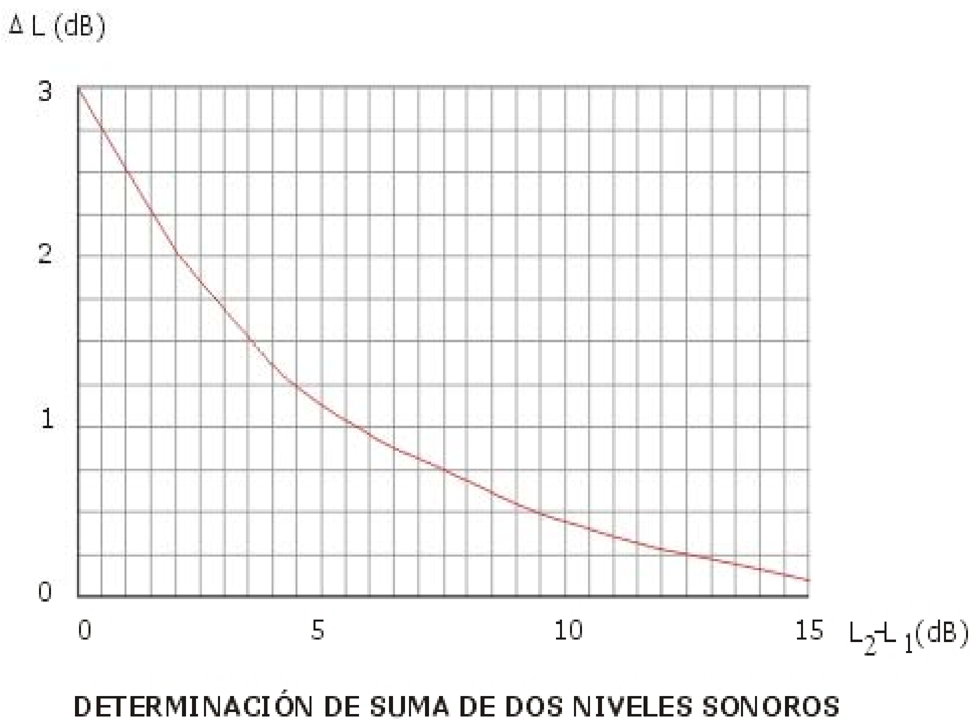


Gráfico 1.8. Suma de dos niveles sonoros

Para sumar más de dos de niveles sonoros, se ordenan de menor a mayor y se van sumando de dos en dos empezando por el menor

Ejemplo: Obtener la suma los niveles siguientes: 65, 60, 72, 65, 62 y 67 dB

1. Se ordenan de menor a mayor: 60, 62, 65, 65, 67, 70

2. Se suman dos a dos

60 $\oplus$ 62 = 64 *($\oplus$ suma energética)*

64 $\oplus$ 65 = 67,5

67,5 $\oplus$ 65 = 69,3

69,3 $\oplus$ 67 = 71

71 $\oplus$ 70 = 73,5

Resta de niveles sonoros

En algunos casos es necesario restar niveles de ruido. Para ello se aplica la fórmula considerando con signo negativo las cantidades $10^{\frac{L_i}{10}}$ que se restan.

El método gráfico es similar a la suma; el valor encontrado al cruzar con la gráfica es el que se resta al nivel mayor.

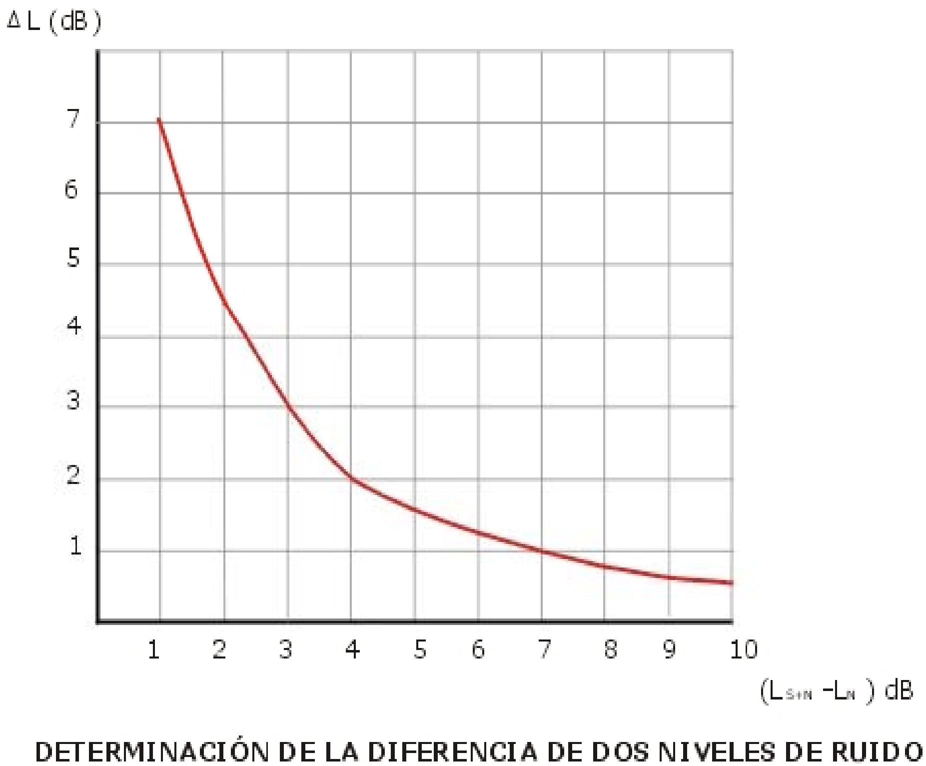


Gráfico 1.9. Resta de dos niveles sonoros

2.3 La percepción de los sonidos

La percepción subjetiva del sonido depende de múltiples factores. Así por ejemplo, la intensidad distingue entre sonidos altos y bajos y está relacionada con la intensidad acústica o con la presión acústica eficaz, y el tono, diferencia los sonidos agudos de los graves y está relacionado con la frecuencia del sonido (cuanto más agudo es un sonido mayor es su frecuencia). Otros factores pueden ser el timbre, el ritmo, etc.

Aparecen, pues, dos conceptos esencialmente distintos aunque íntimamente relacionados: por un lado, la onda sonora o ente físico capaz de producir la sensación de sonido; y por el otro, la sonoridad o sensación subjetiva producida por ciertas variaciones de presión en el oído.

En general, los sonidos están formados por unión de componentes de distinta frecuencia, dependiendo su sonoridad de las contribuciones relativas de cada componente, es decir de las frecuencias presentes y de las intensidades correspondientes. Físicamente, se representan mediante su espectro de frecuencia.

La sonoridad es una característica subjetiva. Estudios realizados sobre un gran número de oyentes ha permitido tabular un conjunto de curvas de igual sonoridad (curvas isosónicas) que indican, para cada nivel de sonoridad, el nivel sonoro de los distintos tonos puros que producen la misma sensación sonora (se comprueba que la corrección de nivel entre dos frecuencias distintas para que ofrezcan la misma sonoridad depende del valor de la sonoridad).

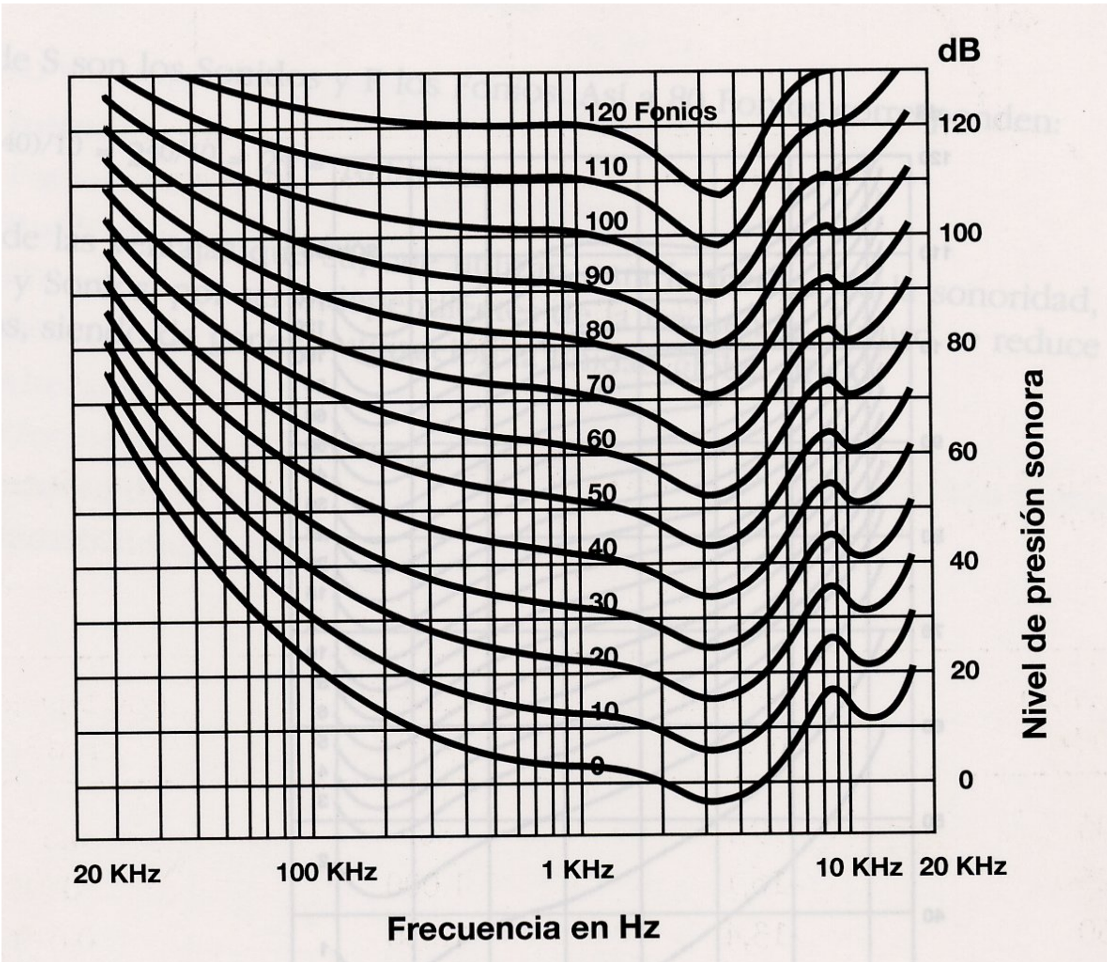


Gráfico 1.10. Curvas de igual sonoridad

- Curvas de ponderación en frecuencia

El oído humano no es sensible de la misma manera a las diferentes frecuencias. Así, para un mismo nivel de presión sonora, un ruido será tanto más molesto cuanto mayor proporción de altas frecuencias contenga. Basándose en las curvas de isosonoridad del oído humano se definieron una serie de filtros con la pretensión de ponderar la señal recogida por el micrófono de acuerdo con la sensibilidad del oído, es decir, atenuando las frecuencias bajas, para poder reflejar un nivel sonoro representativo de la sensación de ruido realmente recibida.

Para tener en cuenta esta sensibilidad se introduce en la medida del ruido el concepto de filtros de ponderación. Estos filtros actúan de manera que los niveles de presión de cada banda de frecuencia son corregidos en función de la frecuencia según unas curvas de ponderación. Con este criterio se han definido varios filtros, siendo los más conocidos los denominados A, B, C y D.

El filtro utilizado en el dominio del ruido del transporte es el A, y los niveles de presión sonora utilizados se miden en decibelios A, dBA.

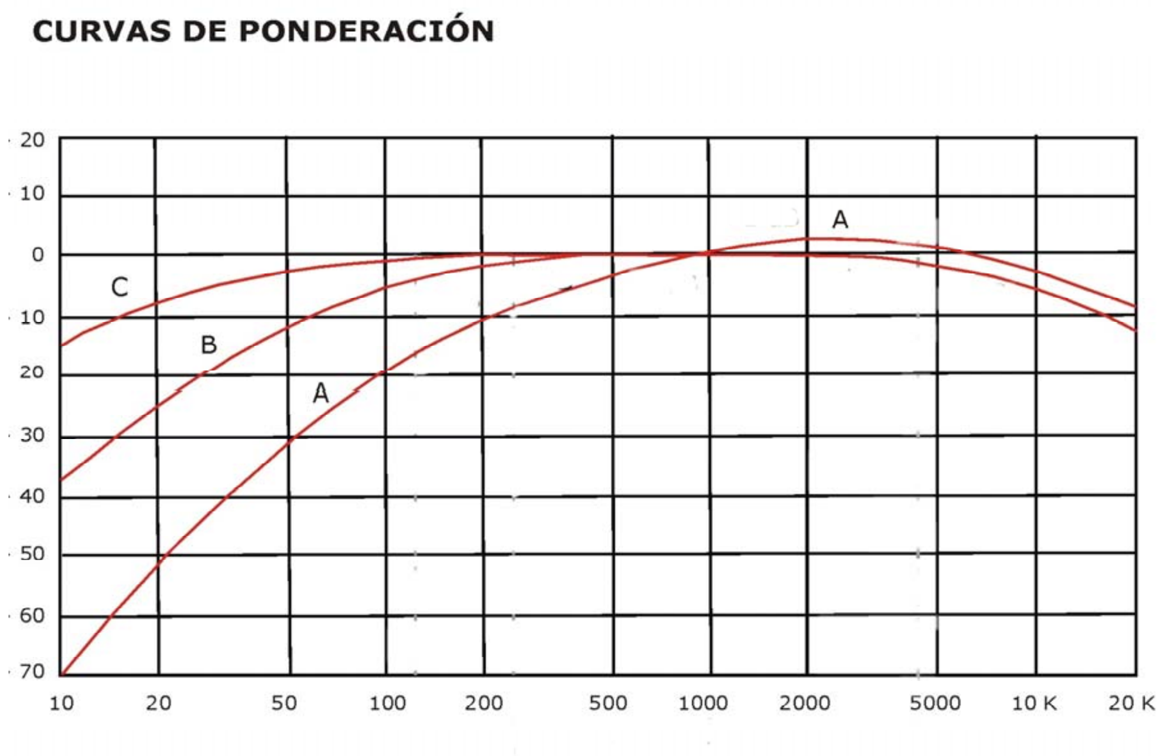


Gráfico 1.11. Curvas de ponderación en frecuencia

3. LA PROPAGACION DEL SONIDO EN CAMPO LIBRE

3.1. Atenuación por la distancia. Fuentes sonoras puntuales y lineales

En el estudio de la propagación del sonido en campo libre, es decir, en ambientes exteriores, es preciso diferenciar dos tipos de fuentes sonoras

En el caso de las fuentes sonoras puntuales, se considera que toda la potencia de emisión sonora está concentrada en un punto. Se suelen considerar como fuentes puntuales aquellas máquinas estáticas o actividades que se ubican en una zona relativamente restringida del territorio. Dependiendo del detalle del análisis las fuentes puntuales muy próximas pueden agruparse y considerarse como una única fuente.

Para fuentes puntuales, la propagación del sonido en el aire se puede comparar a las ondas de un estanque. Las ondas se extienden uniformemente en todas direcciones, disminuyendo en amplitud según se alejan de la fuente.

En el caso ideal que no existan objetos reflectantes u obstáculos en su camino, el sonido proveniente de una fuente puntual se propagará en el aire en forma de ondas esféricas según la relación



Gráfico 1.12. Propagación del sonido de una fuente puntual

$$I = \frac{p^2}{\rho \cdot c} = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

Si expresamos en decibelios la relación entre el nivel de potencia acústica de la fuente y la presión sonora originada en un punto alejado a una distancia r obtendremos:

$$L_W = L_p + 20 \cdot \log r + 11$$

A partir de esta relación, se puede deducir que para un medio homogéneo, cada vez que doblamos la distancia, el nivel de presión sonora disminuye 6dB.

Si el sonido proviene de una fuente lineal, éste se propagará en forma de ondas cilíndricas, obteniéndose una diferente relación de variación de la energía en función de la distancia. Una infraestructura de transporte (carretera o vía ferroviaria), considerada desde el punto de vista acústico, puede asimilarse a una fuente lineal. Este artificio es una simplificación del problema, y solamente es válida si se razona en niveles de presión sonora equivalente integrados sobre un tiempo superior a la duración del paso de un vehículo. En los estudios de ruido del transporte se trabaja normalmente en estas condiciones.

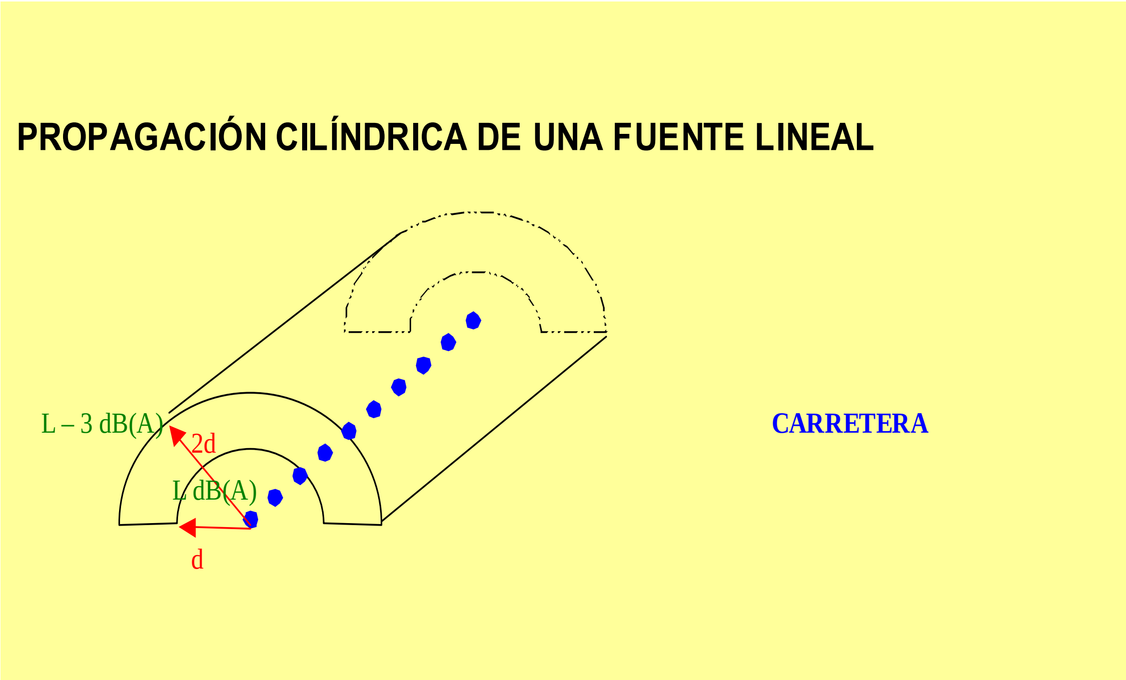


Gráfico 1.13. Propagación del sonido de una fuente lineal

En el caso de fuentes lineales, la propagación del sonido se rige por la expresión

$$I = \frac{p^2}{\rho \cdot c} = \frac{W}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Si expresamos en decibelios la relación entre el nivel de potencia sonora de la fuente y la presión sonora originada en un punto alejado a una distancia r obtendremos:

$$L_W = L_p + 10 \cdot \log r + 8$$

En este caso, para una propagación en condiciones homogéneas, al doblar la distancia el nivel de presión sonora disminuye 3dB.

3.2. Atenuación por absorción del aire

La atenuación de las ondas sonoras en la atmósfera real no sigue exactamente las leyes de la divergencia geométrica, ya que el aire no es un gas de densidad homogénea, ni está en absoluto reposo. Existe, en consecuencia, una atenuación suplementaria debida a la absorción por el aire de parte de la energía acústica que la transforma en calor.

Esta atenuación depende de la frecuencia del sonido, de la temperatura y de la humedad del aire. Cuanto mayor es la frecuencia, mayor es la atenuación experimentada.

Los valores de atenuación del ruido por absorción del aire se obtienen experimentalmente para unas ciertas condiciones de temperatura y humedad. En los casos habituales varían de 0,3 dB(A) a 1 dB(A) por cada 100 de recorrido en el aire, medidos según las diferentes frecuencias.

ABSORCION POR EL AIRE EN LA PROPAGACIÓN

Frecuencia en Hz	Atenuación en dBA por 100
125	0,03
250	0,066
500	0,157
1000	0,382
2000	0,953

3.3. Influencia de la temperatura y del viento en la propagación

Las variaciones de temperatura tienen una neta influencia sobre la densidad del aire, y por lo tanto, sobre la velocidad de propagación de las ondas sonoras (c = f(densidad)).

La temperatura del aire puede decrecer con la altitud (caso más usual), o bien, crecer con ella (inversión térmica). Si la temperatura decrece con la altura, los rayos sonoros se curvan con pendiente creciente, provocando una zona de sombra alrededor de la fuente. Sin embargo, en el caso de inversión térmica, los rayos se curvan hacia el suelo, eliminando la zona de sombra. Esta situación de inversión térmica puede provocar un aumento de 5 a 6 dB(A) con relación a la situación normal.

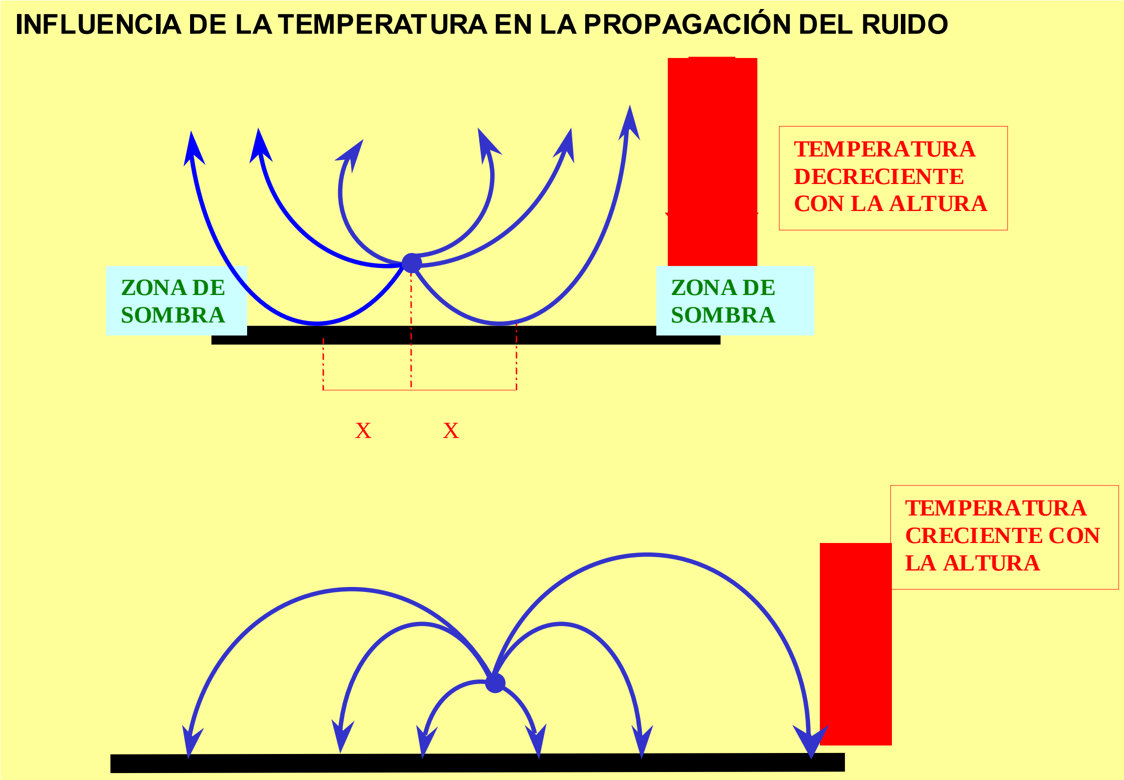


Gráfico 1.14. Influencia de la temperatura en la propagación

La influencia del viento puede motivar, así mismo, variaciones del orden de 5 dB(A) entre las distintas situaciones. En presencia del viento, el sonido, en lugar de propagarse en línea recta, se propaga según líneas curvas.

En el sentido del viento, el sonido se propaga mejor, y los rayos sonoros se curvan hacia el suelo. Contra el viento, el sonido se propaga peor que en ausencia del mismo, y los rayos sonoros se curvan hacia lo alto, formándose, a partir de una cierta distancia de la fuente (normalmente superior a los 200 metros), una zona de sombra.

La atenuación debida al viento es un fenómeno muy complejo difícil de modelizar, y en los casos en que existan en un lugar vientos dominantes característicos es aconsejable realizar mediciones directas para la estimación de su efecto sobre la propagación del ruido

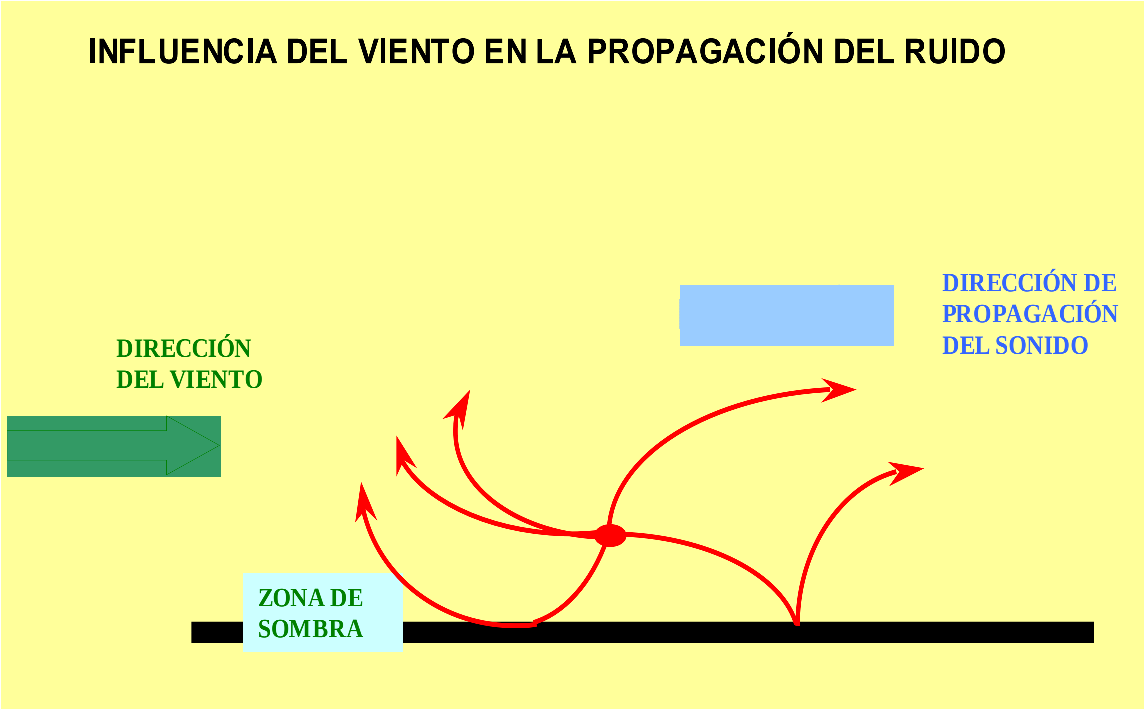


Gráfico 1.15. Influencia del viento en la propagación.

3.4. El efecto de los obstáculos

Si no existen obstáculos, el sonido emitido por una fuente se propaga en campo libre por el aire hasta alcanzar al receptor sin más atenuación que la debida a la distancia entre ambos y a la absorción del aire.

Si se interpone un obstáculo entre la fuente y el receptor, la propagación del sonido resulta modificada. Cuando una onda sonora encuentra un obstáculo sólido, una parte de la energía es reflejada por el obstáculo, otra parte es absorbida por el mismo, penetrando en su interior y transformándose en vibraciones mecánicas que pueden eventualmente radiar nuevas ondas acústicas, y, finalmente, el resto de la energía "bordea" el obstáculo, produciéndose una perturbación del campo acústico por efecto de la difracción.

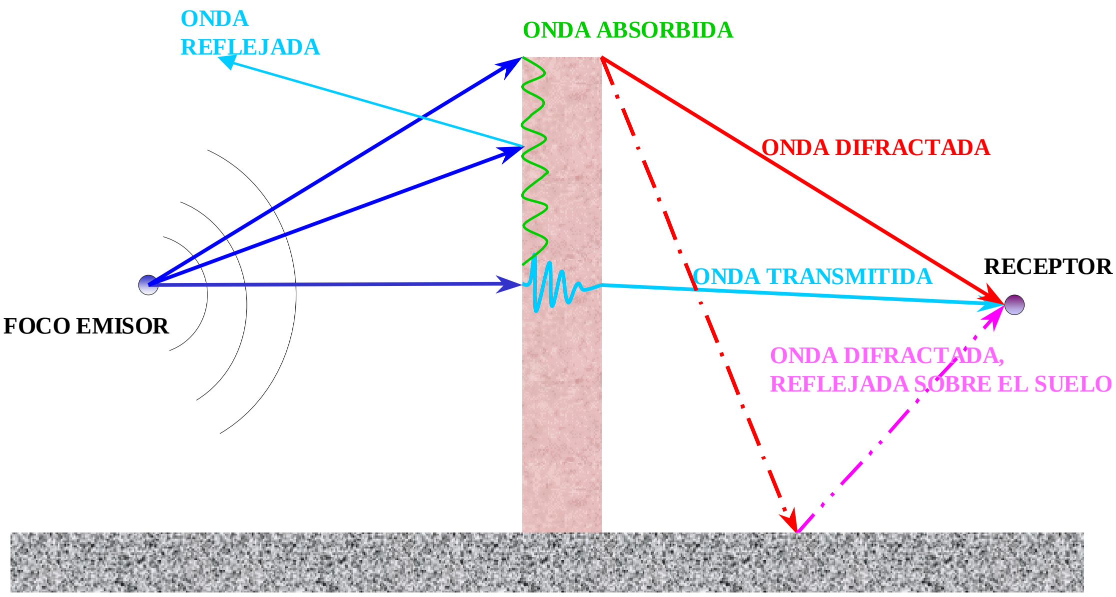


Gráfico 1.16. Efecto de los obstáculos en la propagación

REFLEXIÓN

La presión sonora en un punto es debida no sólo a la radiación directa de la fuente, sino también al sonido indirecto procedente de todas las reflexiones que se producen. Si la energía reflejada es alta, estamos ante una superficie reflectante, acústicamente dura, que se comporta de un modo similar a los espejos con la luz.

Para los estudios y cálculos de las reflexiones suele utilizarse la teoría geométrica basada en la propagación del sonido en línea recta. De ahí el concepto utilizado de rayo sonoro por analogía con el rayo luminoso. Dependiendo de las características del obstáculo donde se produce la reflexión, el rayo sonoro puede reflejarse en una sola dirección o en varias direcciones, con lo que el estudio de su comportamiento se hará más complejo.

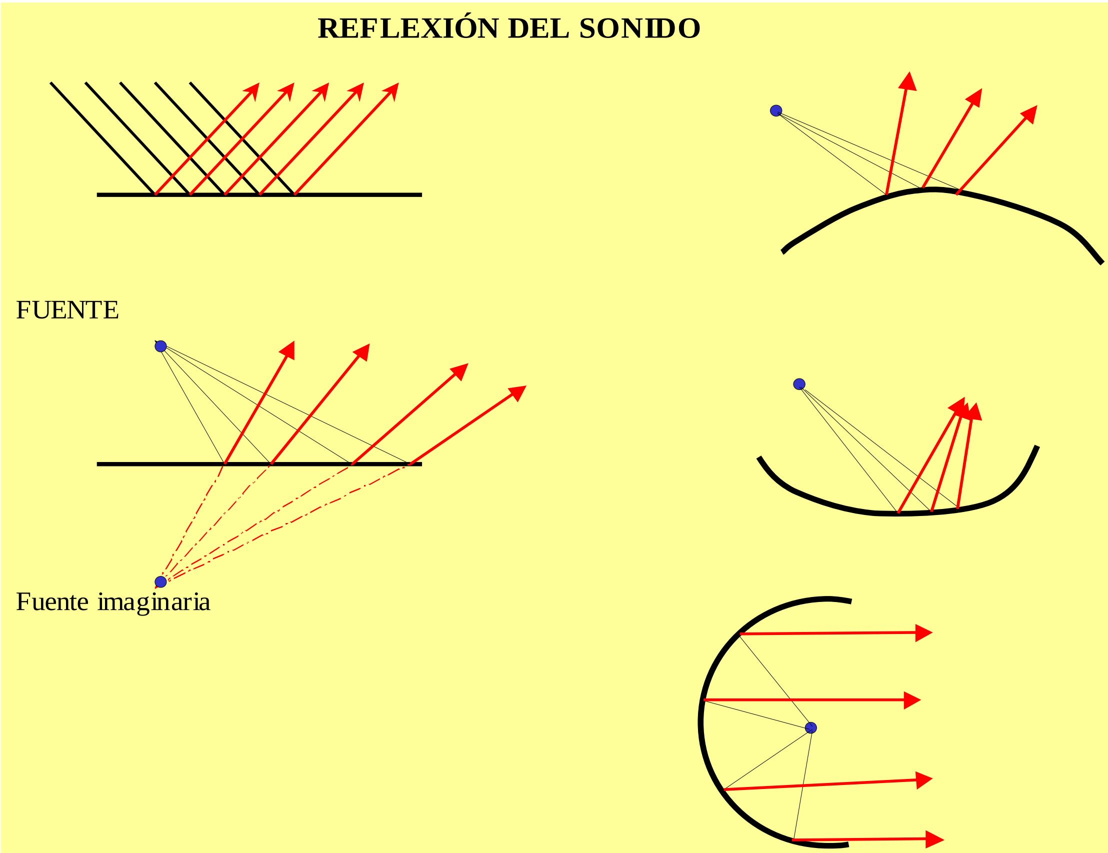


Gráfico 1. 17. Reflexión del sonido

ABSORCIÓN

Cuando una onda sonora incide sobre una superficie, una pequeña parte de la energía se disipa absorbida por la misma. La absorción de la superficie es una función que depende de bastantes parámetros tales como rugosidad, porosidad, flexibilidad, y, en algunos casos, sus propiedades resonantes.

La eficacia de una superficie o material absorbente se expresa como un número entre 0 y 1, llamado coeficiente de absorción, α, de manera que 0 representa la no absorción, es decir, reflexión perfecta y 1 corresponde a la absorción perfecta.

La expresión es:

$$\alpha = \frac{Energia_absorbida}{Energia_incidente}$$

El coeficiente de absorción es una función que varía con la frecuencia de la onda sonora por lo que es necesario conocer el espectro de ruido para juzgar el efecto que producirá el material absorbente sobre el ruido.

Para conocer el comportamiento global frente a la absorción de los dispositivos anti-ruido en campo libre se emplea un índice global **DL_α** expresado en decibelios , cuya expresión es:

$$DL_\alpha = -10 \log \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{18} \alpha_{Si} . 10^{0,1Li}}{\sum_{i=1}^{18} 10^{0,1Li}} \right] dB$$

donde

α_{si} es el coeficiente de absorción sonora en la banda de tercio de octava iésima.

L_i es el nivel de presión sonora en dB, compensado según la curva A en la banda de tercio de octava iésima

AISLAMIENTO (Transmisión)

Los obstáculos que encuentra una onda sonora en su propagación actúan como "barreras" ante el sonido. La capacidad que presenta un material o un obstáculo para oponerse al paso de la energía sonora a través del mismo (transmisión) se conoce como aislamiento. El mayor o menor aislamiento depende fundamentalmente del espesor y la masa superficial del obstáculo.

La pérdida por transmisión (TL) es la relación entre la energía sonora incidente y la energía sonora transmitida y se expresa en decibelios

$TL = 10 \log (E_i / E_t)$

Análogamente a la absorción, para conocer el comportamiento global frente al aislamiento de los dispositivos anti-ruido en campo libre se emplea un índice global **DL_R** expresado en decibelios , cuya expresión es:

$$DL_R = -10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^{18} 10^{0,1Li} . 10^{-0,1Ri}}{\sum_{i=1}^{18} 10^{0,1Li}} \right] dB$$

DIFRACCIÓN

Cuando una onda sonora encuentra un obstáculo que es pequeño en relación con la longitud de onda λ, el frente de onda en los bordes del mismo cambia de dirección. Este fenómeno se denomina difracción, y tiene como consecuencia que la denominada zona de sombra acústica (zona protegida situada detrás de un obstáculo) es considerablemente menor que la zona de sombra visual.

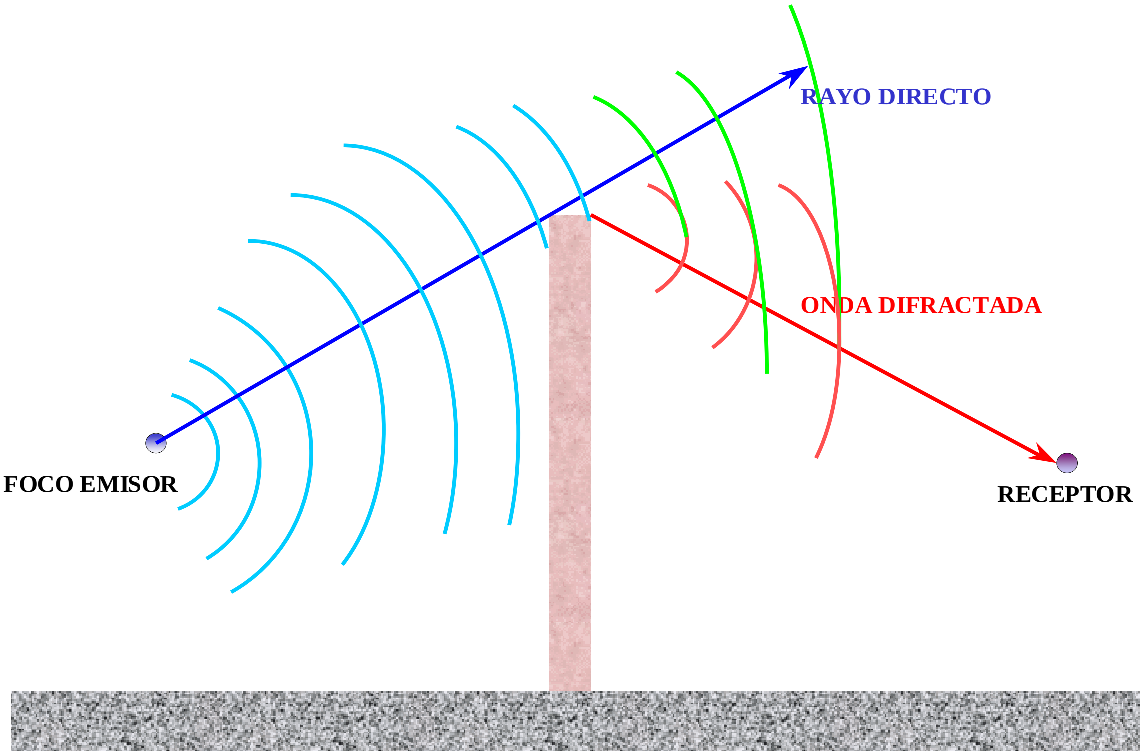


Gráfico 1.18. Difracción de las ondas sonoras

3.5. El efecto "suelo"

Se denomina "efecto de suelo" o "efecto suelo" a las alteraciones producidas en la propagación de un sonido por la presencia de un determinado tipo de suelo.

Por una parte, el suelo actúa como un obstáculo sólido, reflejando una fracción de la energía acústica y absorbiendo el resto. Por otra parte, existen en las proximidades del suelo (sus efectos pueden sentirse hasta una altura de 10 metros) gradientes de temperatura y humedad, variables a lo largo del tiempo, movimientos de tierra, vegetación, y diversos obstáculos naturales que ralentizan la propagación del sonido, y provocan una absorción difícilmente evaluable.

Esta situación hace que la ley de atenuación de los niveles sonoros con la distancia se vea modificada por el efecto de suelo. A falta de modelos precisos, existen curvas experimentales para la evaluación de éste en función de la distancia a la fuente y el tipo de suelo.

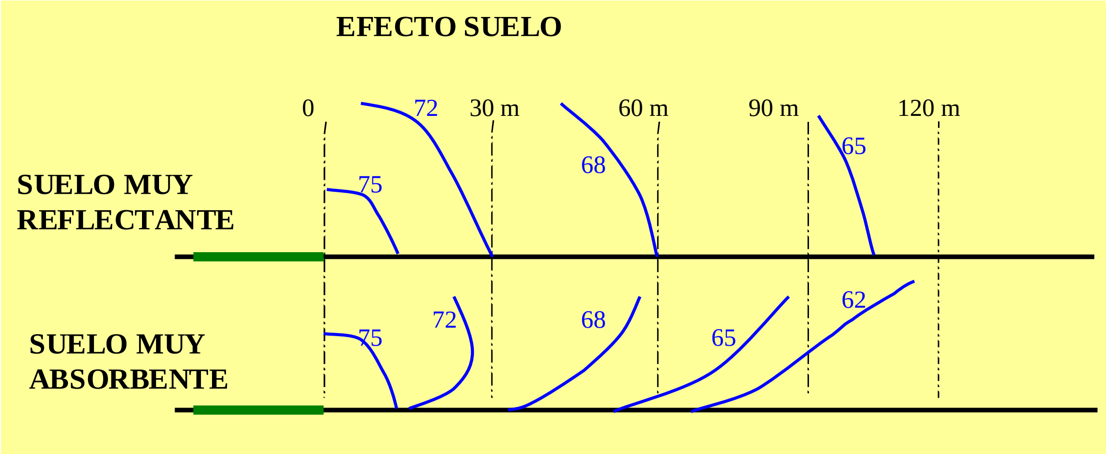


Gráfico 1.19. Efecto "suelo"

4. INDICES PARA LA EVALUACION DEL RUIDO AMBIENTAL

4.1. Las molestias debidas al ruido

El estudio del origen y propagación del sonido permite determinar las características principales del ruido, entendido éste como *un sonido no deseado***.** Sin embargo, el carácter de molestia intrínseco a la definición de ruido, añade un componente de carácter no acústico, que necesita de la contribución de la fisiología, la psicología, la sociología y otras disciplinas para ser correctamente interpretado. Desde un punto de vista medioambiental, el estudio y control del ruido tienen sentido en cuanto a su utilidad para alcanzar una determinada protección de la calidad del ambiente sonoro. Los sonidos son analizados para conocer los niveles de inmisión en determinadas áreas y situaciones, y conocer el grado de molestia sobre la población. Existen situaciones en las que estas molestias son evidentes, ya que la exposición al ruido puede provocar daños físicos evaluables. Sin embargo, en gran parte de los casos, el riesgo para la salud no es tan fácil de cuantificar, interviniendo factores psicológicos y sociales que suelen ser analizados desde un punto de vista estadístico.

El grado de molestia tiene un componente subjetivo que introduce una considerable complejidad en el intento de establecer los criterios de calidad del ambiente sonoro. Conviene recordar aquí que el concepto de subjetividad no está reñido con un análisis científico de los problemas, y existirán indicadores de ruido que estén mejor o peor correlacionados con el grado de molestia.

Para poder abordar el problema del ruido, es necesario, por lo tanto, el establecimiento de un indicador que “explique” adecuadamente este grado de molestia. Entre el gran número de parámetros e índices desarrollados en el campo de la acústica para el estudio de los sonidos es preciso seleccionar *un indicador de molestias* (a ser posible un índice numérico) que sirva de base para la evaluación del impacto y para el establecimiento de valores límite de inmisión que garanticen una determinada calidad del ambiente sonoro. Por otra parte, para ser operativo, este índice debe ser fácil de obtener y de interpretar.

Las molestias debidas al ruido dependen de numerosos factores. El índice que se seleccione debe ser capaz de contemplar las variaciones o diferentes situaciones de los siguientes aspectos, entre otros:

a) La energía sonora: Las molestias que produce un sonido están directamente relacionadas con la energía del mismo. A mas energía (sonido más fuerte) más molestia. El índice básico relacionado con la energía sonora es el nivel de presión sonora.

b) Tiempo de exposición: Para un mismo nivel de ruido, la molestia depende del tiempo al que un determinado sujeto está expuesto a ese ruido. Podemos estar contemplando periodos de segundos, minutos, horas o incluso una vida laboral entera. En general, un mayor tiempo de exposición supone un mayor grado de molestia.

c) Características del sonido: Para un mismo nivel de ruido y un mismo tiempo de exposición, la molestia depende de las características del sonido: espectro de frecuencias, ritmo, etc. La música es un sonido que en general resulta agradable

d) El receptor: No todas las personas consideran el mismo grado de molestia para el mismo ruido. Dependiendo de factores físicos, distintas sensibilidades auditivas, y en mayor medida de factores culturales, lo que para uno son ruidos muy molestos, para otros pueden no serlo. Los factores culturales están relacionados con la experiencia vital del sujeto y sus expectativas. Distintas sociedades reaccionan de manera diferente frente a sonidos más o menos “familiares”. En las culturas occidentales, las mayores diferencias se encuentran entre los habitantes de los pequeños núcleos rurales y los de las grandes ciudades. Dentro de un mismo sector de población, el factor edad parece ser también significativo.

e) La actividad del receptor: Para un mismo sonido, dependiendo de la actividad del receptor, éste puede ser considerado como un ruido o no. El caso más evidente es el de los periodos de descanso. Un sonido que puede ser considerado como agradable (un concierto de música) se convierte en un ruido molesto si el receptor pretende dormir. Sonidos que durante la actividad laboral pasan desapercibidos, se convierten en ruidos perfectamente reconocibles en periodos de descanso. Algunas actividades o estados requieren ambientes sonoros más silenciosos (lectura, enfermedades, conversaciones, etc.), percibiéndose como ruido cualquier sonido que no esté relacionado con la actividad.

f) Las expectativas y la calidad de vida: Dentro de este epígrafe se engloban aquellos aspectos subjetivos, difíciles de evaluar, que están relacionados con la calidad de vida de las personas. Para ciertos grupos de personas, las exigencias de calidad ambiental para el tiempo y los espacios dedicados al ocio son muy superiores a las de otras situaciones. El caso más frecuente es el de las viviendas de segunda residencia, en las que los ruidos se perciben en general como mucho más molestos que en la vivienda principal, debido a las expectativas de descanso depositadas en la segunda residencia. También sucede habitualmente que en entornos de una gran calidad ambiental, se aceptan peor los ruidos que en entornos medioambientalmente degradados.

La selección del indicador que se va a utilizar en el estudio se convierte así en una cuestión decisiva, ya que éste tiene por finalidad indicar las molestias que el ruido produce en la población, y dado el carácter subjetivo de las mismas, surgen numerosas discusiones en cuanto a la validez de los indicadores como descriptores de las molestias.

El objetivo de las acciones de los técnicos y responsables del medio ambiente es conseguir que el ruido soportado por la población no sobrepase ciertos niveles admisibles. Estos niveles, como se vio anteriormente, varían según la fuente del ruido, la naturaleza del receptor y la actividad que este desarrolla, y del tiempo de exposición al ruido. La adopción de índices descriptores del ruido que tengan en cuenta todos estos factores no es una cuestión fácil.

Por un lado existen criterios sanitarios que establecen, para la protección del sistema auditivo y salud en general, límites máximos admisibles de ciertos índices que reflejan la exposición de las personas al ruido. Por otro lado, existen criterios de calidad ambiental que establecen, para otro tipo de índices, umbrales en función de las demandas o exigencias de las personas y las colectividades frente al ruido.

Dado el fuerte componente subjetivo de la respuesta individual de las personas y la creciente preocupación medioambiental de las sociedades desarrolladas, en la que, por otra parte, influyen notablemente los niveles cultural y económico, los estudios y encuestas psico-sociológicas resultan imprescindibles para establecer qué indicadores de ruido son los mejor relacionados con las molestias percibidas.

Tras muchos años de investigación no se ha conseguido aún una unanimidad de criterios en cuanto a la validez de los indicadores utilizados hasta la actualidad, y la cuestión está sujeta a un continuo debate y revisión. Desde el punto de vista de la gestión del medio ambiente sonoro representa un grave inconveniente, ya que induce frecuentemente a grandes errores a la hora de evaluar la calidad del medio ambiente sonoro.

4. 2. Índices básicos

- <u>Nivel de presión sonora (nivel sonoro). L, SPL</u>

Varía a lo largo del tiempo. Se expresa por L_A cuando se mide en decibelios A, que es lo habitual en estudios medioambientales. Para un determinado periodo de tiempo T, se pueden determinar entre otros los valores L_{Amax} , el máximo valor de nivel de presión sonora (SPL) alcanzado durante todo el intervalo de estudio, y L_{Amin} , el mínimo valor. Representan el ruido

de mayor y menor intensidad y no aportan información sobre su duración ni sobre la exposición total al ruido.



Gráfico 1.20. Evolución del nivel de presión sonora al borde de una carretera

- Nivel de presión sonora continuo equivalente. $L_{Aeq}(T)$

Expresa la media de la energía sonora percibida por un individuo en un intervalo de tiempo, es decir, representa el nivel de presión que habría sido producido por un ruido constante con la misma energía que el ruido realmente percibido, durante el mismo intervalo de tiempo. El nivel de presión sonora equivalente debe ir acompañado siempre de la indicación del período de tiempo al que se refiere. Se expresa $L_{Aeq}(T)$ o $L_{Aeq.T}$ que indica la utilización de la red de ponderación A, y su formulación matemática es:
donde:

$$L_{Aeq}(T) = 10\,\mathrm{LOG}\left(\frac{1}{T}\right)\int_T \left(\frac{P}{P_0}\right)^2 dt$$

T = tiempo de duración de la medición

P = presión sonora instantánea en Pa

P_o = presión de referencia = $2 * 10^{-5}$ Pa
En la práctica el cálculo del L_{Aeq} se realiza sumando n niveles de presión sonora L_i emitidos en

$$L_{Aeq}(T) = 10\,\mathrm{LOG}\left(\frac{1}{T}\right)\Sigma\, 10^{L_i/10} \cdot t_i$$

los intervalos de tiempo t_i , y la expresión adopta la forma (discreta):

donde: T = t_i = tiempo de exposición

L_i = nivel de presión sonora constante en el intervalo i

t_i = tiempo del intervalo i correspondiente al nivel L_i

El L_{Aeq} se expresa en dBA, y no tiene sentido si no va acompañado de una base de tiempo o intervalo de observación:

$$L_{Aeq}\ (t^1,t^2)\ \text{ o }\ L_{Aeq}\ (T)$$

Índices de la serie estadística (niveles percentiles). L_N

La variación del nivel de presión sonora en un período de tiempo dado puede registrarse, y descomponer el período de medida en intervalos constantes para cada uno de los cuales se obtienen sus correspondientes niveles de presión sonora. Si el período es lo suficientemente largo, para ciertas fuentes de ruido, la repartición de los niveles sigue una ley normal.

Se definen los siguientes valores:

Nivel L_1 : nivel alcanzado o sobrepasado durante el 1% del tiempo en el período considerado. (Es un valor muy cercano al ruido máximo).

Nivel L_{10} : nivel alcanzado o sobrepasado durante el 10% del tiempo.

Nivel L_{50} : nivel que se sobrepasa el 50% del tiempo de medición. Es la mediana estadística. (Representa el ruido medio)

Nivel L_{90} : nivel alcanzado o sobrepasado durante el 90% del tiempo. (A veces suele tomarse este valor como el ruido de fondo)

Nivel L_N : nivel alcanzado o sobrepasado durante el N% del tiempo

Estos índices estadísticos, muy utilizados hasta hace cierto tiempo y empleados todavía en algunos países, presentan, sin embargo, algunos inconvenientes de importancia para su aplicación al ruido originado por el transporte

- En la práctica es necesario disponer de un número de muestras importante. En el caso del tráfico de carreteras se precisan intensidades superiores a 500 v/h para que sean significativos. En el caso del tráfico ferroviario, en general, no son representativos.
- No informan más que de la probabilidad de alcanzar o sobrepasar un determinado nivel, en un lugar concreto, durante un N% del tiempo, y no responden a una formulación matemática precisa.

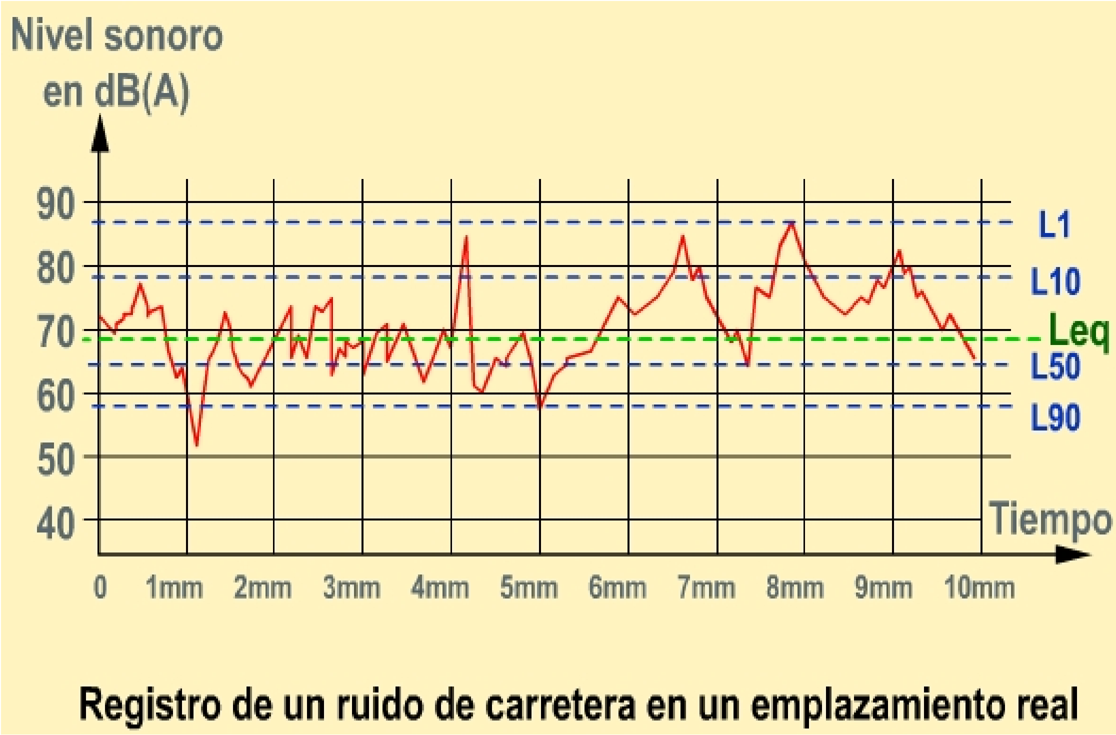


Gráfico 1.21. Nivel sonoro continuo equivalente y niveles estadísticos

- Nivel de exposición sonora (SEL) : se define como el nivel de presión sonora de un ruido continuo que tiene la misma energía en un segundo que la del ruido real durante el intervalo de tiempo T. Se utiliza para clasificar y comparar sucesos de ruido de diferente duración.

$$SEL = 10 \log (1/T_0) \quad 10^{Li/10} \cdot t_i$$

donde : T_0 = 1 segundo

t_i = tiempo durante el cual el nivel sonoro es L_i

t_i = tiempo real de exposición

La relación ente el L_{Aeq} y el SEL para un suceso de ruido es:

$$SEL = L_{Aeq} (T) + 10 \log (T/T_o) \quad \text{donde } T_o = 1 \text{ seg.}$$

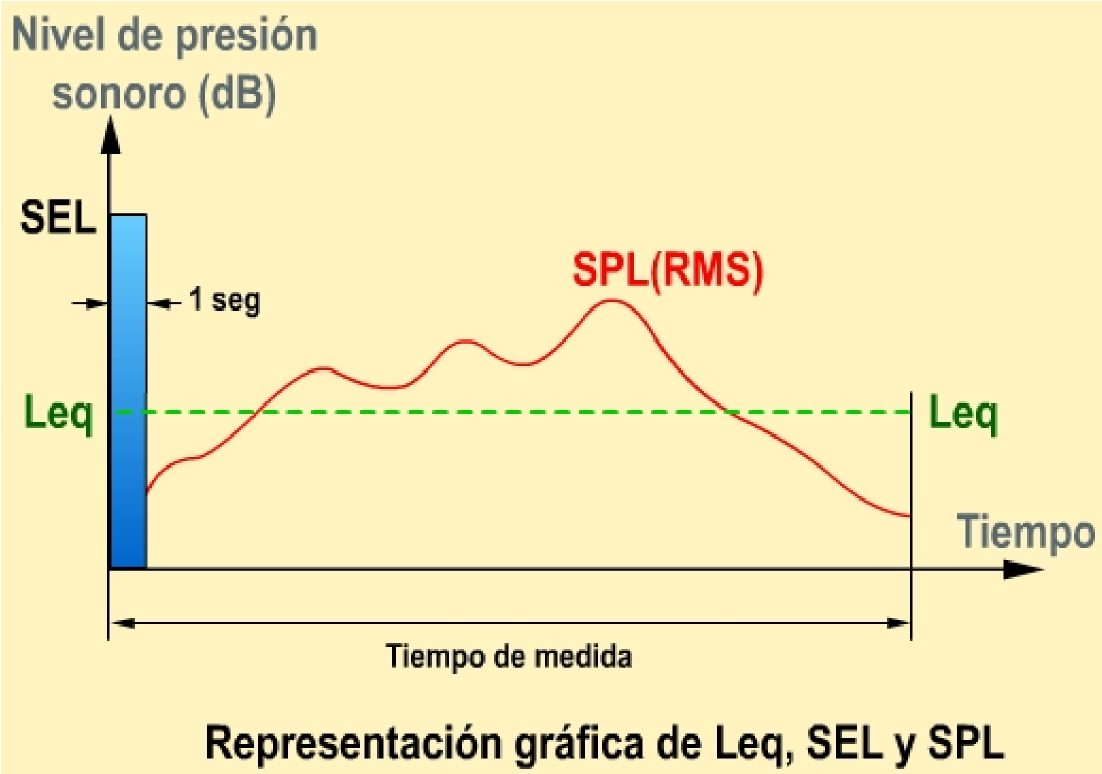
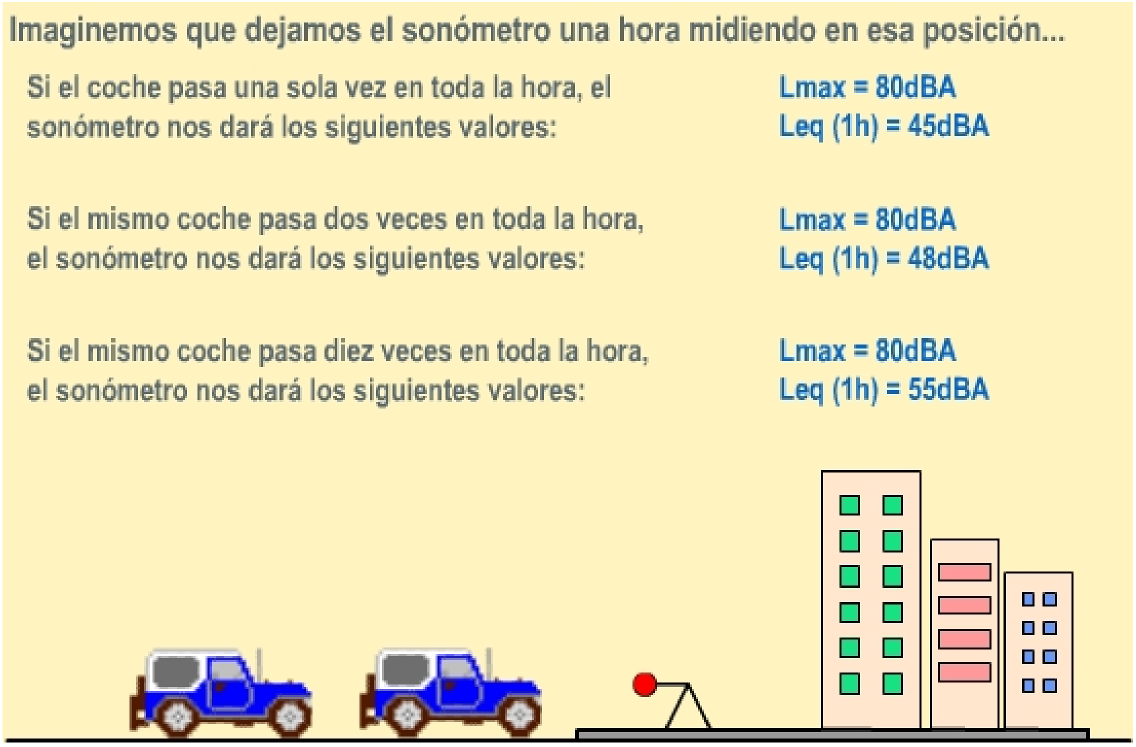


Gráfico 1.22. Nivel sonoro continuo equivalente y nivel de exposición sonora

4.3. El L_{Aeq} (t) como indicador del ruido ambiental

El nivel de presión sonora equivalente L_{Aeq}(T) es un índice relativamente complejo que plantea algunos problemas de comprensión por parte del público general. No corresponde, tal y como se cree a menudo, a una simple media aritmética de los niveles sonoros instantáneos. El L_{Aeq} (T) realiza la suma de la energía acústica recibida durante el intervalo de tiempo. Es frecuente comprobar como se habla de niveles de ruido sin indicar si se trata de niveles máximos o equivalentes y sin especificar el período de tiempo a que está referido, lo que resulta no solamente incorrecto, sino que puede inducir a graves errores a la hora de comparar situaciones o sucesos sonoros diferentes.

Por ejemplo, supongamos que cuando un vehículo ligero pasa por la calle de un centro urbano, el L_{max} alcanzado al paso del vehículo durante un segundo a una cierta distancia del mismo es de 80 dB(A). Si no existe ningún otro ruido durante una hora en esa calle, el L_{Aeq} (1 hora) será de aproximadamente 45 dB(A). Si en vez de pasar una sola vez durante la hora de estudio, el vehículo pasara dos veces, el L_{max} alcanzado seguiría siendo 80 dB(A), mientras que el L_{Aeq} (1 hora) será 48 dB(A). Si fueran 10 veces las que pasara el vehículo el L_{max} continuaría siendo 80 dB(A), y el L_{Aeq} habría aumentado hasta 55 dB(A). Como se puede apreciar en este ejemplo el L_{max} no tiene en cuenta ni el número de veces en que el ruido alcanza ese valor ni el tiempo durante el cual ese valor es alcanzado. Por contra, el L_{eq} tiene en cuenta el conjunto de los ruidos soportados durante un cierto período de tiempo, y además tiene en cuenta a la vez el nivel de ruido y duración.



Las encuestas y estudio psico-sociológicos realizadas en los países de la C.E.E. han permitido establecer las reacciones de la población frente al ruido y cuantificar las molestias soportadas.

En España no se dispone en la actualidad de un estudio fiable en este campo. Como resultado de estos estudios aparece que entre los indicadores más utilizados, el L_{Aeq} extendido a períodos largos de tiempo es el indicador más pertinente y el mejor correlacionado con las respuestas de la población al ruido originado por el tráfico de carretera. El L_{Aeq} permite evaluar bien la molestia de la población en general, pero sin embargo no explica bien las grandes variaciones existentes en las respuestas individuales. Estas molestias individuales están ligadas a factores sociales y culturales difíciles de evaluar. Se relacionan con fenómenos como la valoración individual del descanso, el rechazo a ciertos tipos de ruido, las expectativas de calidad de vida, etc.
Estas circunstancias no invalidan la utilización del L_{Aeq} como indicador universal de ruido, pero si ponen de manifiesto la necesidad en algunos casos de completar la evaluación con otro tipo de índices sectoriales.

Hasta la actualidad, el indicador comúnmente utilizado en España es el nivel sonoro continuo equivalente L_{Aeq} referido a un periodo diurno y a un periodo nocturno. La determinación de los periodos nocturnos varía según los municipios y el sector regulado. En cuanto a los límites máximos que se determinan para cada indicador, existe un denominador común en casi todos los casos, consistente en establecer distintos criterios en función de los usos del suelo. De un modo general se establecen límites más restrictivos para usos docentes y hospitalarios, que para uso residencial en general. Existen límites más altos para uso industrial que para uso residencial, y así sucesivamente.

El uso del L_{Aeq} como indicador de las molestias de ruido generado en el entorno de los aeropuertos se está generalizando en todos los países desarrollados. Esta tendencia tiene su origen en el proceso integrador de control del ruido existente en la actualidad, en el que se consideran de forma conjunta todas las posibles fuentes de ruido. Dado que existe desde hace algunos años una gran unanimidad en cuanto al uso del L_{Aeq} como indicador del ruido en los campos de exposición ocupacional, ruido de los transportes terrestres, ruido en ambientes exteriores, etc., su utilización para el ruido de los aviones permite establecer comparaciones y agregar fácilmente los niveles procedentes de distintas fuentes. Esta cualidad del L_{Aeq} , debida

a su carácter de indicador energético, no la tienen otros índices específicos utilizados históricamente para la descripción del impacto acústico del tráfico aéreo.

A pesar de las limitaciones, citadas anteriormente, que poseen los índices expresados en niveles continuos equivalentes, la mayoría de las administraciones europeas tienden a utilizar el L_{Aeq} (o índices derivados de éste) como indicadores universales, debido fundamentalmente a las siguientes ventajas que ofrecen:

1. Es un índice relativamente sencillo de comprender, en comparación con otros índices.

2. Es un índice que mide un concepto acústico muy claro: la energía media durante un determinado periodo de tiempo

3. Es un índice que permite establecer comparaciones y agregar niveles procedentes de diversas fuentes

4. Es el índice más utilizado en las evaluaciones de impacto ambiental

5. Las directivas europeas y las normas CEN utilizan el L_{Aeq}

6. Es un índice que permite considerar diferentes periodos de tiempo para la evaluación del impacto

7. Es un índice que permite comparar los niveles originados por una determinada fuente con los niveles de fondo ambientales existentes en una determinada zona

8. Es un índice que se puede obtener directamente de los instrumentos de medida.

Estas son fundamentalmente las razones que han llevado a la adopción del L_{Aeq} como indicador del ruido general en las legislaciones nacionales de algunos países con gran desarrollo en materia de lucha contra el ruido.

4. 4. La distribución temporal: los períodos día, noche y tarde-noche. El L_{den}

La evaluación de la calidad del medio ambiente sonoro está determinada entre otros factores por la actividad, e incluso por la actitud, de los receptores del ruido. Un ruido soportable e unas determinadas circunstancias, no lo es en otras, lo que significa que un indicador de carácter general (por ejemplo el L_{Aeq} diario) difícilmente puede explicar todas las situaciones.

En general en una sociedad urbanizada las actividades humanas están ligadas al espacio y al tiempo. Por lo que se refiere al espacio, las acciones de control del ruido se pueden realizar mediante el establecimiento de distintos límites admisibles del valor del L_{Aeq} según los usos del suelo (residencial, industrial, hospitalario, ocio, etc.). Sin embargo, por lo que se refiere a la distribución temporal del ruido (conviene recordar que el L_{Aeq} se refiere a un determinado período de tiempo), los estudios realizados han demostrado que las reacciones de la población son muy diferentes según el período del día. En general, el ruido es más tolerado durante el período de actividad diurna, menos en los períodos de descanso de tarde-noche, y mucho menos en el período nocturno. Para poder tener en cuenta estas variaciones se utilizan, en vez de un único indicador, varios indicadores, y se establecen limites admisibles para cada uno ellos. La mayoría de las reglamentaciones de los países de nuestro entorno utilizan dos índices: el L_{Aeq} (día) y el L_{Aeq} (noche).

El primer problema que se plantea es decidir cual es el período de noche y cuál es el período de día. En el cuadro siguiente observamos como existe una gran diferencia entre los intervalos de tiempo de referencia utilizados en los países de nuestro entorno en sus normativas de protección del medio ambiente sonoro (en exteriores).

A pesar de la falta de estudios en profundidad, en los países del sur de Europa el período de tarde-noche es un período de actividad de características distintas a los del norte y centro de

Europa, y en todos los casos se trata de un período critico, en el que las quejas de la población son muy numerosas. España en concreto representa un caso especial debido a la diferencia de duración de actividad de este período.

A diferencia de los países del norte, la actividad en la calle se prolonga hasta bien entrada la noche, lo que unido a costumbres derivadas de condicionantes climatológicos (ventanas de los edificios abiertas) hace que los períodos de tiempo establecidos en otros países no sean adecuados para el nuestro.

Para poder tener en cuenta estas diferentes exigencias de calidad ambiental sonora en función de los diferentes periodos de actividad se pueden utilizar índices integrados sobre 24 horas.

- Nivel sonoro día-tarde-noche (L_{DEN}, L_{den})

El indicador L_{den}, propuesto por la Unión Europea, es el nivel equivalente día-tarde-noche en decibelios A, y se calcula según la siguiente fórmula:

$$L_{den} = 10 \cdot \log \left(\frac{12 \cdot 10^{\frac{Lday}{10}} + 4 \cdot 10^{\frac{Levening+5}{10}} + 8 \cdot 10^{\frac{Lnight+10}{10}}}{24} \right)$$

L_{dia}= nivel sonoro medio a largo plazo ponderado a definitivo en la norma ISO 1996 2: 1987, determinado a lo largo de todos los periodos diurnos del año.

Ltarde= nivel sonoro medio a largo plazo ponderado a definitivo en la norma ISO 1996 2: 1987, determinado a lo largo de todos los periodos vespertinos del año.

$L_{noche\ t}$= nivel sonoro medio a largo plazo ponderado a definitivo en la norma ISO 1996 2: 1987, determinado a lo largo de todos los periodos nocturnos de un año.

En principio, el día dura 12 horas, la tarde 4 horas y la noche, 8 horas. Siguiendo las recomendaciones de la normativa común europea, los periodos de tiempo básicos para la evaluación y control del ruido ambiental los periodos de referencia son: diurno desde las 7h a las 19 h., tarde desde las 17h a las 23 h. y nocturno desde las 23h a las 7 h, aunque una gran parte de las ordenanzas municipales en vigor y normativas autonómicas consideran como periodo diurno desde las 8 h a las 22 h y nocturno de las 22 h a las 8 h.